

## Волоконные ВКР-лазеры с длиной волны генерации более 2 мкм

Е.М.Дианов, И.А.Буфетов, В.М.Машинский, В.Б.Неуструев, О.И.Медведков, А.В.Шубин, М.А.Мелькумов, А.Н.Гурьянов, В.Ф.Хопин, М.В.Яшков

*Впервые созданы одномодовые волоконные ВКР-лазеры с длиной волны излучения 2.0 и 2.2 мкм и выходной мощностью несколько сотен милливатт. Усиление излучения достигалось в световоде с сердцевиной из двуокиси германия и оболочкой из плавяного кварца при накачке излучением волоконного Er/Yb-лазера.*

**Ключевые слова:** волоконный ВКР-лазер, волоконный Er/Yb-лазер, GeO<sub>2</sub>-световод.

В настоящее время достигнут значительный прогресс в создании высокоэффективных непрерывных волоконных ВКР-лазеров (рамановских лазеров) в ближнем ИК диапазоне. При использовании иттербиевых лазеров на световодах с двойной оболочкой в качестве источников накачки и световодов с низким уровнем потерь на основе плавяного кварца, легированных P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> и GeO<sub>2</sub>, в качестве ВКР-усиливающей среды возможно создание лазеров практически на любой длине волны в области от 1.1 до 1.7 мкм [1]. Наибольшая длина волны, на которой до настоящего времени наблюдалось ВКР в световодах, составляет ~1.9 мкм: в [2] получена генерация второй стоксовой компоненты в волоконном ВКР-лазере мощностью около 15 мВт в диапазоне 1.8–1.9 мкм при КПД до 2% с накачкой на  $\lambda = 1.55$  мкм. Представляет большой интерес расширение диапазона генерации ВКР-лазеров в область за 2 мкм вообще и за область генерации волоконных лазеров на ионах Tm<sup>3+</sup> и Ho<sup>3+</sup> в световодах на основе плавяного кварца в частности (примерно за 2.1 мкм).

Длинноволновая граница существования эффективных ВКР-лазеров на основе световодов из плавяного кварца (публикации по ВКР-лазерам на основе световодов других типов до настоящего времени отсутствуют) определяется снижением коэффициента ВКР-усиления материала сердцевины и оболочки при увеличении длины волны, увеличением диаметра поля моды излучения и возрастанием оптических потерь в световоде. В результате ВКР-усиление не может компенсировать оптические потери излучения при разумных значениях мощности накачки.

Оценить пороговую мощность накачки для ВКР-лазеров по порядку величины можно из условия равенства коэффициента усиления распределенным оптическим потерям в световоде (поскольку именно они выходят на передний план около длинноволновой границы):  $\alpha_S =$

$g_0 P_{th}$ , где  $\alpha_S$  – оптические потери в световоде на длине волны ВКР-генерации;  $g_0$  – коэффициент рамановского усиления световода (КРУС);  $P_{th}$  – пороговая мощность накачки (здесь мы пренебрегаем изменением  $P_{th}$  по длине световода). Характерное значение оптических потерь стандартных германосиликатных световодов (с сердцевиной из плавяного кварца, легированного GeO<sub>2</sub> с молярной концентрацией ~3%) на  $\lambda \approx 2.1$  мкм составляет  $\alpha_S \approx 100$  дБ/км при  $g_0 < 3$  дБ·км<sup>-1</sup>·Вт<sup>-1</sup> [3]. Таким образом, оценка снизу пороговой мощности накачки для ВКР-лазеров на основе стандартных световодов в данной спектральной области дает очень большое значение пороговой мощности  $P_{th} = \alpha_S/g_0 \sim 30$  Вт.

Снижение  $P_{th}$  до приемлемых значений ~1 Вт возможно, в частности, при повышении значения КРУС на порядок или больше.

Стекло из GeO<sub>2</sub> является перспективным волоконно-оптическим материалом в области за 2 мкм, т.к. потенциально оно обладает низкими оптическими потерями (~0.22 дБ/км на длине волны 2 мкм) и высокой нелинейностью (см., напр., [4]). Нами по MCVD-технологии был изготовлен одномодовый волоконный световод на основе плавяного кварца с сердцевиной (молярное содержание GeO<sub>2</sub> 75%) и с отражающей оболочкой из SiO<sub>2</sub> (в дальнейшем GeO<sub>2</sub>-световод) [5].

Спектральная зависимость оптических потерь в этом световоде представлена на рис.1, здесь же для сравнения показано распределение оптических потерь в стандартном световоде с сердцевиной из SiO<sub>2</sub>, легированного GeO<sub>2</sub> (молярное содержание до 3%). Минимальное значение оптических потерь в GeO<sub>2</sub>-световоде сдвинуто в область вблизи 1.85 мкм и составляет около 20 дБ/км. Несмотря на сравнительно высокий абсолютный уровень потерь в области 2–2.2 мкм (~100 дБ/км), совпадающий по порядку величины с уровнем потерь в стандартном световоде, большая разность показателей преломления сердцевины и отражающей оболочки ( $\Delta n \sim 0.1$ ) и большое сечение ВКР-рассеяния в GeO<sub>2</sub> по сравнению с SiO<sub>2</sub> обеспечивают высокое значение коэффициента рамановского усиления GeO<sub>2</sub>-световода, что компенсирует высокие оптические потери при мощности накачки порядка одного ватта.

Длина волны нулевой материальной дисперсии GeO<sub>2</sub> равна 1.73 мкм [6]. Длина волны нулевой полной дис-

Е.М.Дианов, И.А.Буфетов, В.М.Машинский, В.Б.Неуструев, О.И.Медведков, А.В.Шубин, М.А.Мелькумов. Научный центр волоконной оптики при Институте общей физики им. А.М.Прохорова РАН, Россия, 119991 Москва, ул. Вавилова, 38  
А.Н.Гурьянов, В.Ф.Хопин, М.В.Яшков. Институт химии высококачественных веществ РАН, Россия, 603600 Нижний Новгород, ул. Тропинина, 49

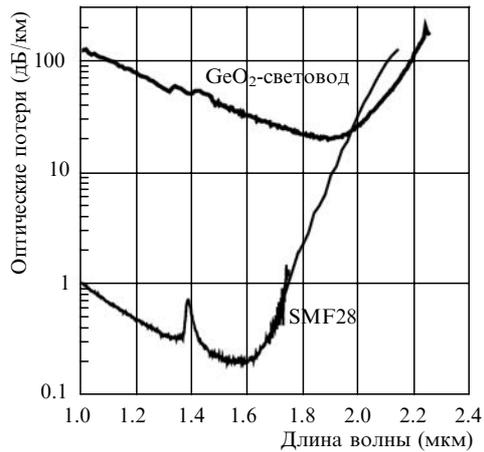


Рис.1. Спектральная зависимость оптических потерь в  $\text{GeO}_2$ -световоде с молярной концентрацией  $\text{GeO}_2$  в сердцевине 75 % и длиной волны отсечки 1.4 мкм и в стандартном телекоммуникационном световоде SMF28 с молярной концентрацией  $\text{GeO}_2 \sim 3\%$ .

персии  $\text{GeO}_2$ -световода ( $\sim 2.5$  мкм) оценивалась по измененному профилю показателя преломления световода и по результатам измерений дисперсии в диапазоне 1.3–1.6 мкм. Таким образом, длина волны нулевой дисперсии  $\text{GeO}_2$ -световода по сравнению с таковой для большинства других световодов на основе плавного кварца существенно сдвинута в длинноволновую область, и поэтому можно ожидать, что влияние четырехфотонного взаимодействия на процессы в ВКР-лазере на  $\text{GeO}_2$ -световоде в диапазоне длин волн от 1.6 до 2.2 мкм будет незначительным из-за отсутствия условий для выполнения фазового синхронизма.

Наши измерения КРУС в  $\text{GeO}_2$ -световоде, выполненные по порогу ВКР-генерации в резонаторе с известными потерями, показали, что при длине волны генерации 1.12 мкм и длине волны накачки 1.07 мкм  $g_0(1.12/1.07) = 300$  дБ·км<sup>-1</sup>·Вт<sup>-1</sup>. Таким же образом получены значения КРУС на других длинах волн:  $g_0(1.57/1.47) = 112$  дБ·км<sup>-1</sup>·Вт<sup>-1</sup> и  $g_0(1.725/1.608) = 59$  дБ·км<sup>-1</sup>·Вт<sup>-1</sup>. (Для сравнения: световод с молярной концентрацией  $\text{GeO}_2$  в сердцевине 20 % имеет  $g_0(1.500/1.407) = 18$  дБ·км<sup>-1</sup>·Вт<sup>-1</sup>, а стандартный световод со смещенной дисперсией –  $g_0(1.500/1.407) = 3$  дБ·км<sup>-1</sup>·Вт<sup>-1</sup> [3]). Таким образом, несмотря на достаточно резкое снижение  $g_0$  с возрастанием длины волны,  $\text{GeO}_2$ -световод позволяет создать ВКР-лазер в области 2 мкм при мощности накачки несколько ватт.

Проведенные исследования фоточувствительности  $\text{GeO}_2$ -световода показали, что она достаточно высока для записи брэгговских решеток в сердцевине световода с помощью излучения второй гармоники аргонового лазера без предварительной пропитки световода водородом [5]. Данное обстоятельство позволило исключить дополнительные оптические потери во вложенных резонаторах ВКР-лазера путем записи брэгговских решеток непосредственно в активном световоде.

В настоящей работе мы сообщаем о реализации трех- и четырехкаскадных ВКР-лазеров с длиной волны излучения 2.06 и 2.2 мкм соответственно. Схема четырехкаскадного лазера представлена на рис.2 (схема трехкаскадного лазера аналогична). В качестве источника накачки применялся разработанный нами одномодовый непрерывный волоконный  $\text{Er}^{3+}$ -лазер с длиной волны излуче-

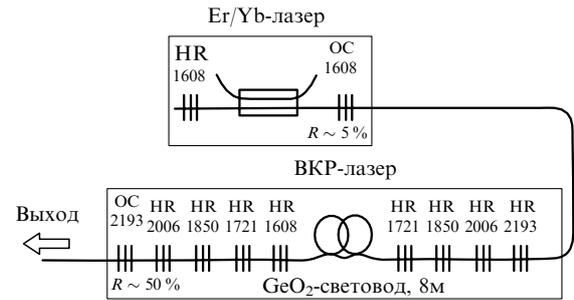


Рис.2. Схема четырехкаскадного волоконного лазера с длиной волны излучения 2.2 мкм; HR – брэгговская решетка с коэффициентом отражения  $R$ , близким к 100 %, OC – выходные брэгговские решетки лазеров. Около каждой решетки указана резонансная длина волны (в нм).

ния 1608 нм, использующий световод с двухэлементной первой оболочкой (световод типа GTWave [7]) и сердцевинной, легированной ионами  $\text{Er}^{3+}$  и  $\text{Yb}^{3+}$ . Накачка эрбиевого лазера осуществлялась источником многомодового излучения ( $\lambda = 0.975$  мкм) на основе лазерных диодов с волоконным выходом (NewOptics, Великобритания). Максимальная мощность излучения с  $\lambda = 1608$  нм, вводимая в  $\text{GeO}_2$ -световод, составила 4.7 Вт.

Сдвиг частоты, соответствующий максимуму коэффициента ВКР-усиления, в изготовленном  $\text{GeO}_2$ -световоде оказался равным  $427$  см<sup>-1</sup>, что несколько меньше аналогичного сдвига в световодах с умеренным содержанием  $\text{GeO}_2$  ( $440$  см<sup>-1</sup>).

В случае трехкаскадного ВКР-лазера длина  $\text{GeO}_2$ -световода составила 13 м. Такая длина была определена численным моделированием работы ВКР-лазера как оптимальная для получения максимальной выходной мощности в условиях наших экспериментов. Оптимальная длина четырехкаскадного лазера оказалась равной 8 м. Частотные сдвиги между каскадами выбирались приблизительно соответствующими максимальному коэффициенту рамановского усиления.

Трехкаскадный ВКР-лазер позволил достигнуть длины волны генерации 2 мкм. Спектр излучения на выходе лазера, полученный с помощью монохроматора МДР-4 и фотоприемника на основе PbSe, представлен на рис.3,а, где пики соответствуют излучению накачки (1608 нм), первого каскада (1732 нм), второго каскада (1864 нм) и третьего каскада ВКР-лазера (2027 нм). Пороговая мощность накачки для генерации третьего каскада составила 1.6 Вт, максимальная мощность на выходе ВКР-лазера на длине волны 2 мкм составила 900 мВт, что соответствует полному КПД 19 %, причем дифференциальный КПД достигал 39 %. Таким образом, была продемонстрирована принципиальная возможность создания эффективных ВКР-лазеров в области длин волн 2 мкм.

Получение длины волны генерации 2.2 мкм с помощью четырехкаскадного ВКР-лазера на  $\text{GeO}_2$ -световоде наталкивается на резкое возрастание оптических потерь световода в диапазоне от 2 до 2.2 мкм. Если для трехкаскадного лазера потери на любой из используемых длин волн не превышали 40 дБ/км, то на 2.2 мкм потери достигают  $\sim 150$  дБ/км, что ведет к сокращению оптимальной длины световода (8 м) и существенному снижению КПД четырехкаскадного лазера. Тем не менее, нами была получена генерация на длине волны 2.2 мкм. Длины волн всех каскадов лазера указаны на спектре излучения на рис.3,б. Пороговая мощность накачки для генерации

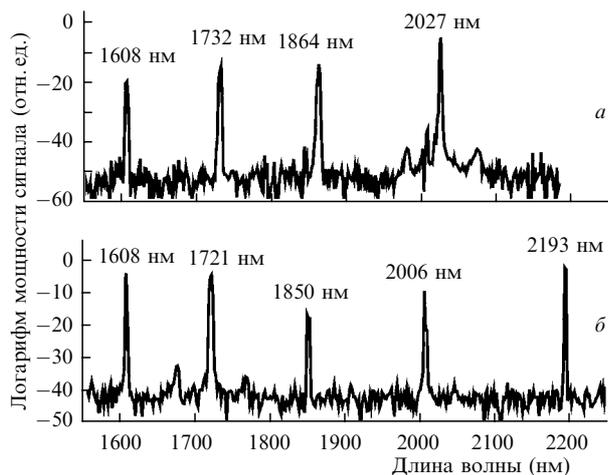


Рис.3. Спектр излучения на выходе трехкаскадного ( $\lambda = 2.0$  мкм) ВКР-лазера (а) и четырехкаскадного (2.2 мкм) ВКР-лазера на  $\text{GeO}_2$ -световоде (б).

четвертого каскада составила 1.1 Вт, максимальная выходная мощность на длине волны 2.2 мкм – 215 мВт при мощности накачки 4.2 Вт ( $\lambda = 1608$  нм). Полный КПД достиг  $\sim 5\%$ .

Таким образом, в настоящей работе впервые экспериментально продемонстрировано, что с помощью волоконных ВКР-лазеров может быть получено излучение с длиной волны до 2.2 мкм. Использование световодов с

сердцевинной на основе  $\text{GeO}_2$  позволяет получать излучение на любой длине волны в диапазоне 1.7–2.2 мкм при соответствующем выборе длины волны накачки и использовании ВКР-лазера с необходимым числом каскадов и величиной частотного сдвига в каждом каскаде.

Дальнейшее снижение потерь в световодах на основе  $\text{GeO}_2$  позволит расширить область генерации ВКР-лазеров до  $\sim 3$  мкм.

Авторы благодарны Л.Н.Бутвине, А.Г.Охримчуку, Ю.Н.Пыркову, А.Е.Ракитину, К.С.Кравцову и С.Ю.Тенякову за помощь при проведении экспериментов, А.К.Сенаторову и У.Г.Ахметшину – за проведение измерений и расчетов дисперсии  $\text{GeO}_2$ -световода. Работа была частично поддержана грантом Президента РФ №НШ-962.2003.2.

1. Dianov E.M., Prokhorov A.M. *IEEE J. Sel. Topics Quantum Electron.*, **6**, 1022 (2000).
2. Persephons P., Chernikov S.V., Taylor J.R. *Electron. Lett.*, **32**, 1486 (1996).
3. Bufetov I.A., Bubnov M.M., Neustruev V.B., et al. *Laser Phys.*, **11**, 130 (2001).
4. Дианов Е.М., Машинский В.М., Неуструев В.Б. *Кр. сообщ. физ. ФИАН*, № 3, 46 (1981).
5. Mashinsky V.M., Medvedkov O.I., Neustruev V.B., et al. *Proc. ECOC – ICOC 2003* (Milan, Italy, 2003, vol. 2, p. 210).
6. Девярых Г.Г., Дианов Е.М., Карлычев Н.С., Мазавин С.Н. и др. *Квантовая электроника*, **7**, 1563 (1980).
7. Grudinin A.V., Turner P.W., Codemard C., et al. *ECOC'2002* (Copenhagen, Denmark, 2002, PD1.6).